

DOI: 10.11973/wsje202001006

# 新核燃料锆合金包壳管材中缺陷 对超声检测的影响

范清松,王 健,石明华,凌海军,惠泊宁,周 军

(西部新核材料科技有限公司,西安 710299)

**摘 要:**选取锆合金管材超声检测时的典型缺陷信号(纵向缺陷、横向缺陷、同位置纵横向缺陷、草状波)对应的管材试样,并将每种类型缺陷按不同信号幅值(20%~25%,25%~30%,30%~35%, $\geq 36\%$ )取样;采用宏观检测及金相层析法对以上试样进行观察,分析讨论管材中的缺陷类型、深度及位置与超声检测信号类型及幅值的关系。结果表明:10  $\mu\text{m}$  级及以上深度的缺陷一般会引起超声检测信号异常,且缺陷深度与超声信号幅值基本呈一定的线性趋势,但存在不完全对应性;管材内外表面及内部的裂纹均会引起超声检测纵横向及纵伤信号幅值的异常,而管材内外表面凹坑会引起超声检测横伤信号幅值的异常;草状波信号与管材晶粒组织、表面粗糙度及缺陷均无直接关系。

**关键词:** 锆合金管材;缺陷;超声检测

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2020)01-0023-04

## Effects of the defect in new nuclear zirconium alloy cladding tube on its ultrasonic testing

FAN Qingsong, WANG Jian, SHI Minghua, LING Haijun, HUI Boning, ZHOU Jun

(Western Energy Material Technologies Co., Ltd., Xi'an 710299, China)

**Abstract:** Test samples with typical defect signal of ultrasonic testing of nuclear zirconium alloy cladding tube were selected, including the same position longitudinal and horizontal defect, single vertical defect and single lateral defect with different signal amplitudes of 20%~25%, 25%~30%, 30%~35% and  $\geq 36\%$ , respectively. The test samples were investigated by macroscopic detection and metallographic method, and the relationship between the type, depth and position of defects in cladding tube and the type and amplitude of ultrasonic detection signals was analyzed. The results show that defects of depth of 10  $\mu\text{m}$  or above generally cause abnormalities of ultrasonic detection signal, and the relationship between the depth of defect and the amplitude of the ultrasonic signal is basically linear, that is, the higher the amplitude, the deeper the depth of the defect. The cracks of the inner surface, outer surface and inside of cladding tube will cause the abnormalities of ultrasonic longitudinal, horizontal, as well as the single vertical detection signals, while the pits on the inner surface and outer surface of the cladding tube will cause the abnormalities of ultrasonic lateral detection signal. The grassy type of signal is not directly related to the grain structure, surface roughness and defect of cladding tube.

**Key words:** zirconium alloy tube; defect; ultrasonic testing

锆合金包壳管是核反应堆的第一道安全屏障,其性能对燃料燃耗、反应堆热效率以及安全可靠

有很大影响。而锆合金管材中缺陷(裂纹、凹坑、划伤、夹杂等)会使其性能急剧恶化,且缺陷均有可能分布在管材内外壁表面或内部。这些缺陷在高温、高压、强辐照、循环水流冲刷及腐蚀等恶劣环境下会逐渐恶化,当缺陷尺寸扩展到一定限值时,燃料棒将发生泄漏,造成巨大损失,所以必须采用无损检测手

收稿日期: 2019-04-15

作者简介: 范清松(1987—),男,硕士,工程师,主要从事核材料结构与性能方面的研究

通信作者: 范清松, fansong0304@163.com

段检出这些缺陷,以保证核反应堆的安全运行。

目前,超声波自动检测以其灵敏度高、速度快、定位准、对人体及环境无危害等优点,成为锆合金包壳管无损检测的主要手段之一,其可检测出管材内外很小尺寸的缺陷<sup>[1]</sup>。

笔者采用核反应堆燃料组件用某新锆合金包壳管作为试验对象,分析样品内外表面及横截面缺陷,以确定成品管材缺陷类型、深度和位置,以及不同缺陷类型、深度和位置对超声检测的影响,从而建立缺陷类型、深度和位置与超声检测异常信号的对应关系。

## 1 检测要求

### 1.1 检测设备

(1) 选用 Roat25(德国)多通道数字化超声波监测系统。

(2) 选用的管材标准试样与被检管材具有相同的材料、制造工艺、几何尺寸及表面状态;试样的标准伤为管材内外表面纵向及横向的 U 型人工槽,尺寸(长×宽×深)为 1.65 mm×0.09 mm×0.045 mm。

### 1.2 检测方法

试验采用水浸线聚焦横波法进行超声检测,管材水浸线聚焦超声检测原理如图 1 所示<sup>[2]</sup>。图 1 中, $\alpha$  为入射角, $\beta$  为折射角, $x$  为偏心距。探头发出的纵波经水耦合进入管壁中,并折射转化为横波沿管壁传播。当遇到缺陷时声波经缺陷侧壁反射,返回的声波被探头接收,经仪器处理形成缺陷信号,而缺陷信号幅值的大小与反射回来的声波数量及缺陷有效反射面的大小有关。

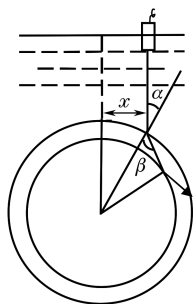


图 1 管材水浸线聚焦超声检测原理示意

### 1.3 检测工艺参数

试验时将人工伤幅值调至满屏的 80% 进行检测,检测参数见表 1。

## 2 试验过程

选取超声检测出含典型缺陷的管材,首先从缺

陷管材对应的带状超声图谱中准确定位缺陷位置,以定位的缺陷为中心,截取约 20 mm 长试样(因为超声检测设备定位精度为±10 mm),试验管材缺陷信号类型及幅值见表 2。

表 1 人工伤超声检测参数

项目	参数
仪器	Rato25
探头形式	线聚焦
探头频率/MHz	15
重复频率/kHz	14
旋转速度/(r·min <sup>-1</sup> )	4 000
送进速度/(m·min <sup>-1</sup> )	6

表 2 试验管材缺陷信号类型及幅值

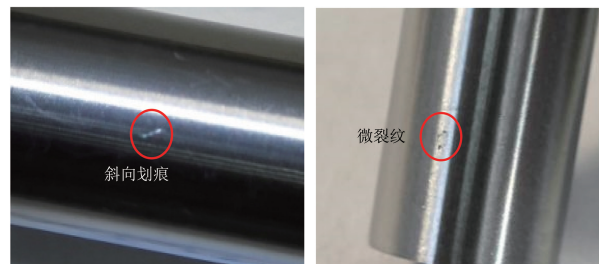
名称	牌号	规格(外径×壁厚×长度)/mm	信号类型	信号幅值/%
锆合金 管材	N36	9.5×0.57×20	纵横伤、纵 伤、横伤	20~25
				25~30
				30~35
			草状波	≥36

首先,目视观察管材内外表面,以确定是否有肉眼可见的缺陷;若有缺陷,则对发现的缺陷进行进一步的金相观察,以确定缺陷类型及深度;若未发现肉眼可见的缺陷,则直接进行金相观察。金相观察均为试样横截面。金相分析采用层析法,以确定缺陷的最大深度,金相观察前采用  $V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{H}_2\text{O}}:V_{\text{HF}}=45:45:10$ (体积比)的配比液对管材横截面进行腐蚀。

## 3 结果与讨论

### 3.1 同位置纵横伤分析

对不同幅值、同位置纵横伤试样进行宏观检查并拍照,图 2 为观察到的不同幅值管材表面缺陷宏观图片。信号幅值为 20%~25% 及 ≥36% 的管材试样未发现有表面缺陷;而在信号幅值为 30%~

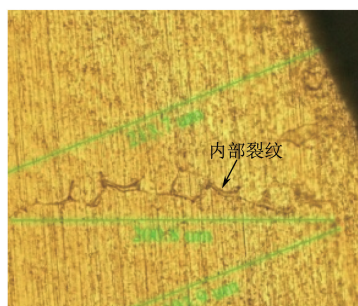


(a) 幅值为30%~35%时的斜向划痕 (b) 幅值为25%~30%时的微裂纹

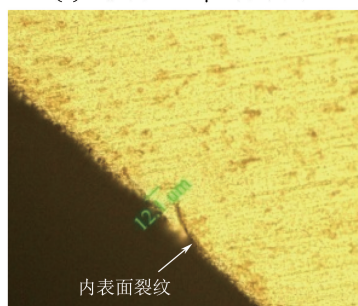
图 2 不同幅值管材表面缺陷宏观图片

35%及25%~30%对应的管材试样外表面分别发现有斜向划痕及微裂纹。

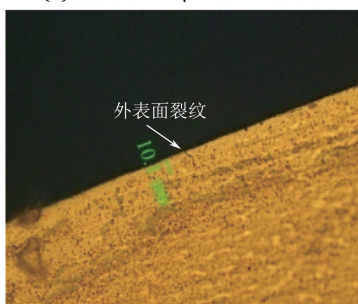
采用层析法对肉眼未发现缺陷的管材试样进行金相观察,并对宏观检查到缺陷的管材试样进行解剖及金相分析,不同信号幅值对应的管材缺陷金相检测结果如图3所示。由图3可以看出,信号幅值 $\geq 36\%$ 的对应缺陷在管材内部,裂纹与管材径向及周向成一定角度,裂纹深度较大,为193.9  $\mu\text{m}$ ,故在宏观检查时未发现管材内外表面有缺陷;而信号幅值为30%~35%,25%~30%,20%~25%的缺陷



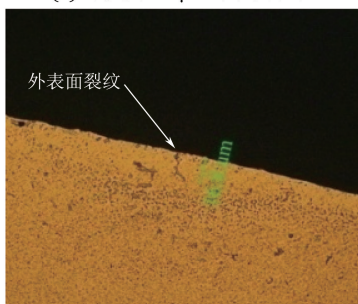
(a) 深度为193.9  $\mu\text{m}$ 内部裂纹



(b) 深度为12.1  $\mu\text{m}$ 内表面裂纹



(c) 深度为0.1  $\mu\text{m}$ 外表面裂纹



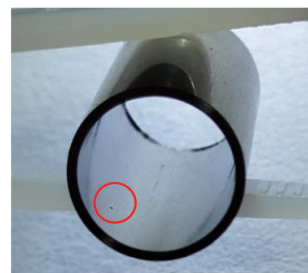
(d) 深度为16.8  $\mu\text{m}$ 外表面裂纹

图3 不同信号幅值对应缺陷的金相检测结果

为管材内外表面裂纹,裂纹深度均在同一数量级,分别为12.1,10.1,16.8  $\mu\text{m}$ ,较信号幅值 $\geq 36\%$ 对应的缺陷深度小很多;但信号幅值 $\geq 36\%$ 及幅值为30%~35%对应的裂纹宽度要大于其他幅值的。可知,引起同位置纵横伤的缺陷为管材内外表面及管材内部裂纹,裂纹深度与超声检测异常信号幅值无直接的对应关系。因为信号幅值的大小与反射回来的声波数量及缺陷有效反射面的大小有关,是由裂纹长度、深度、宽度及裂纹角度等决定的<sup>[3]</sup>。

### 3.2 横伤分析

图4为宏观观察到的不同信号幅值对应的管材表面缺陷图像,信号幅值 $\geq 36\%$ 及幅值为30%~35%时对应的缺陷分别为管材内外表面点坑,而在信号幅值为25%~30%及20%~25%时对应的试样内外表面没有发现缺陷。



(a) 幅值 $\geq 36\%$ 时的内表面点坑



(b) 幅值为30%~35%时的外表面点坑

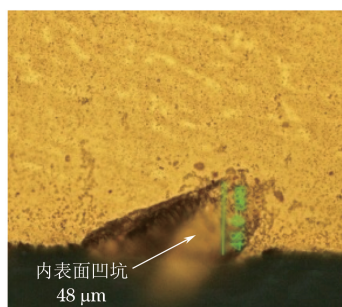
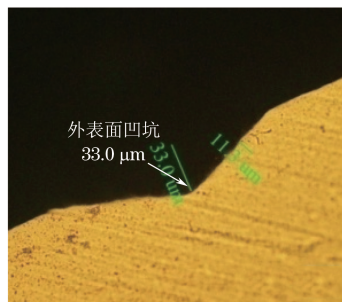
图4 不同信号幅值对应的管材缺陷宏观图片

对以上宏观观察到的点坑进行解剖分析,并对未观察到缺陷的管材试样进行金相观察,结果如图5所示。图4中管材内外表面宏观点坑对应图5中相应幅值金相图片中的凹坑,凹坑深度分别为48  $\mu\text{m}$ 及33  $\mu\text{m}$ ,信号幅值为25%~30%时对应为内表面凹坑,深度为17.3  $\mu\text{m}$ ,而在信号幅值为20%~25%的试样中未观察到凹坑。分析可知,横伤超声检测信号异常是由管材内外表面的点坑(凹坑)引起的,凹坑深度均在同一数量级,但随着缺陷信号幅值的降低,凹坑最大深度有所减小。

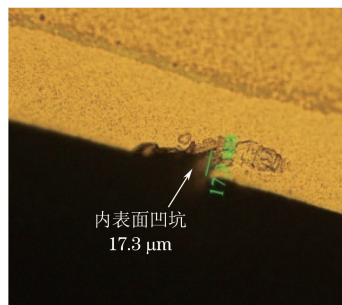
### 3.3 纵伤分析

图6为宏观观察到的信号幅值 $\geq 36\%$ 时对应的管材表面缺陷,缺陷为管材内表面沿轧向(纵向)的



(a) 幅值 $\geq 36\%$ 时的内表面凹坑

(b) 幅值为30%~35%时的外表面凹坑



(c) 幅值为25%~30%时的内表面凹坑

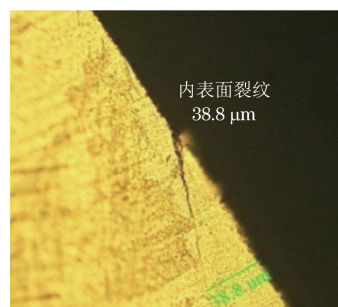
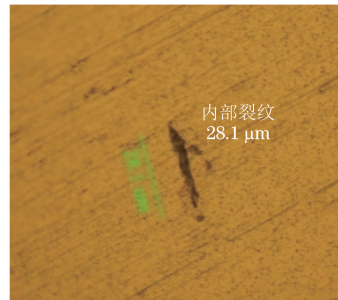
图5 不同幅值对应缺陷的金相检测结果



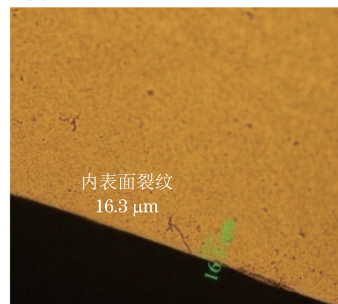
图6 纵伤管材缺陷宏观图片

微裂纹,在其他信号幅值对应的管材试样中未观察到肉眼可见的缺陷。

对以上观察到的管材内表面裂纹进行解剖分析,并对未观察到缺陷的管材试样进行金相观察(见图7)。可以看出,信号幅值 $\geq 36\%$ 、30%~35%及25%~30%时对应的管材缺陷均为裂纹,裂纹分布在管材内表面或内部,裂纹深度分别为38.8,28.1,16.3  $\mu\text{m}$ ,随着缺陷信号幅值的降低,缺陷最大深度减小。

(a) 幅值 $\geq 36\%$ 时的内表面裂纹

(b) 幅值为30%~35%时的内部裂纹



(c) 幅值为25%~30%时的内部裂纹

图7 不同幅值对应缺陷的金相检测结果

### 3.4 草状波分析

选取含草状波管材及正常管材进行外表面粗糙度及横截面金相分析,检测结果如表3所示,由表3可以看出,草状波管材的表面粗糙度与正常管材的一致;图8为正常管材与草状波管材的金相检测结果,二者晶粒大小、分布及形貌均一致,晶粒度为13级左右。可知,晶粒组织及管材粗糙度并非是引起草状波信号的直接原因,管材草状波信号一般可经再次抛光消除<sup>[4]</sup>。



(a) 草状波管材

(b) 正常管材

图8 正常管材与草状波管材金相检测结果

(下转第65页)



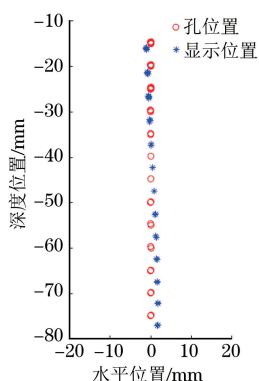


图10 水平及深度定位变化趋势

从图10可以看出,因界面折射产生的缺陷定位偏差随着声程的增加而逐渐增加,水平定位从正偏差逐渐到负偏差,深度定位的负偏差始终在增加。当进行镍基焊缝检测时,输入相关参数进行计算修正,经过修正处理,检测的定位精度达到了90%以上。

## 5 结语

镍基焊缝的组织特点使得常规超声检测难以实施或效果不好。针对该问题,对镍基焊缝的特点及对超声检测的影响进行了深入分析。分析了相控阵超声检测技术的优势,提出了针对镍基焊缝相控阵超声检测的双阵列低频纵波检测方法,并进行了相关的检测试验,结果表明,使用相控阵超声双阵列低频纵波检测工艺检测镍基焊缝,信噪比及缺陷定位精度能满足镍基焊缝的声检测要求,实现了镍基焊缝的超声检测。

(上接第26页)

表3 正常管材与草状波管材的粗糙度  $\mu\text{m}$ 

检测位置	正常管材	草状波管材
粗糙度	0.249 0.206 0.213 0.221	0.244 0.262 0.222 0.238
	0.259 0.243 0.191 0.193	0.304 0.260 0.221 0.214
平均值	0.222	0.246

## 4 结论

(1) 管材内外表面及内部的缺陷均会引起超声检测信号的异常。

(2) 同位置纵横伤及纵伤一般由裂纹引起,而横伤一般由点坑(凹坑)引起,缺陷深度一般大于10  $\mu\text{m}$ 。

(3) 缺陷的最大深度与超声信号幅值基本呈线性趋势,即缺陷越深,幅值越高,但存在着不完全对

## 参考文献:

- [1] 袁浩,马成勇,齐彦昌,等. 690 镍基合金焊条熔敷金属的组织与性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2016, 24(2): 41-46.
- [2] 王冬林,武刚,丰振军,等. 镍基合金小径管焊缝超声检测探析[J]. 热加工工艺, 2013, 42(21): 204-207.
- [3] 周祥曼,田启华,杜义贤,等. 电弧增材成形单道两层熔积过程中的晶粒生长模拟[J]. 机械工程学报, 2018, 54(22): 86-94.
- [4] 张侃. AP1000 主管道奥氏体不锈钢焊缝超声检测建模仿真研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [5] 陈尧,罗忠兵,张东辉,等. 基于 EBSD 技术构建弹性各向异性粗晶材料超声仿真模型的研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(18): 24-30.
- [6] 刘长福,郭德瑞,张坤,等. 相控阵超声技术在插管异种钢镍基焊缝检测中的应用[J]. 无损检测, 2018, 40(2): 29-34.
- [7] 李京安. 超声相控阵扇形扫描检测成像技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [8] 张小龙,张子健,吴家喜,等. 奥氏体不锈钢厚壁对接焊缝的超声相控阵 CIVA 仿真与试验[J]. 无损检测, 2018, 40(9): 30-34, 51.
- [9] 陈冰川,陆文杰,汪明辉. CIVA 仿真软件在核电厂汽轮机叶根相控阵检测中的应用[J]. 无损检测, 2016, 38(6): 41-44.
- [10] 涂春磊,邹建华,强天鹏,等. 对接焊缝相控阵超声检测可靠性的 CIVA 仿真与试验[J]. 无损检测, 2013, 35(11): 22-26.

应性。因为缺陷的取向对超声的影响较大,当声波垂直缺陷表面时,缺陷波幅较高,当缺陷沿一定角度向管壁内部延展,并与管壁呈一定夹角时,缺陷波幅随入射角的增大急剧下降。

(4) 草状波信号与管材晶粒组织、表面粗糙度及缺陷(裂纹、点坑等)均无直接关系。

## 参考文献:

- [1] 刘建章. 核材料科学与工程: 核结构材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [2] 李恒羽,袁改焕,王德华. 核用锆合金管材的超声波检测[J]. 无损检测, 2008, 30(4): 255-257.
- [3] 夏健文,韩承. 核燃料锆合金包壳管的超声波探伤[J]. 核动力工程, 2016, 37(3): 122-126.
- [4] 于海慧,于军辉,李小宁. Zr-4 合金管材超声检测记录条带草状显示原因[J]. 无损探伤, 2015, 39(1): 20-22.